VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Institut dopravy

Návrh řazení souprav vlaků společnosti provozující železniční osobní dopravu

Train composition of company operating public rail transport

Student: René Chyla

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Zadání bakalářské práce

Student: **René Chyla**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie

Téma: Návrh řazení souprav vlaků společnosti provozující železniční osobní dopravu
Train Composition of Company Operating Public Rail Transport

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Osnova práce:
1. Úvod – definování problému v širším kontextu.
2. Analýza současného stavu – rozbor současného systému řazení vlakových souprav, vyhodnocení případných nedostatků.
3. Návrh řešení – formulace požadavků pro vlakové soupravy z hlediska jejich složení pro definovanou nabídku spojů a vytvoření oběhů souprav.
4. Zhodnocení navrženého řešení – vyhodnocení přínosů nového způsobu řazení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Škapa, P.: Provoz dep I. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, 93 s., ISBN 80-248-0540-5
Škapa P.: Provoz dep II. Ostrava: VŠB Ostrava, 2004, 117 s., ISBN 80-248-0670-3
Hranoš, V.; Škapa P.: Vozové hospodářství I. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, 137 s., ISBN 80-248-0677-0

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015
Datum odevzdání: 16.05.2016

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ-TECHNICKÁ UNIVERZITA
Fakulta strojní

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě …………………… ……………………………………

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 53 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě …………………… ……………………………………

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu autora práce: René Chyla

Opavská 6123/18B, 708 00 Ostrava

Poděkování

Rád bych poděkoval také vedoucímu doc. Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D. za vedení této bakalářské práce a spolupráci při její tvorbě a za čas, který mně věnoval při konzultacích. Zároveň vyjadřuji poděkování za cenné připomínky a rady, které vedly ke zkvalitnění této bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

CHYLA R., Návrh řazení souprav vlaků společnosti provozující osobní dopravu. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2016, 45 str. Bakalářská práce, vedoucí: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá dvěma optimalizačními problémy. Prvním z nich je optimalizace počtu kmenových částí vlakových souprav na předem definované obsluhované trase. Druhým optimalizačním problémem je minimalizace docházkové vzdálenosti pro cestující přepravujících se ve vozech vyšší kvality. Úvodní kapitoly popisují danou problematiku, je provedena analýza současného stavu a jsou zformulovány matematické modely potřebné pro vyřešení daných optimalizačních úloh. Závěrečné kapitoly bakalářské práce se věnují zejména dosaženým výsledkům a jejich porovnání s dosavadním stavem.

ANNOTATION OF BACHELOR´S DEGREE WORK

CHYLA R., Train composition of company operating public rail transport. Ostrava: Institute of transport, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2016, 45 pages. Bachelor´s Degree Work, Supervised by: doc. Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

This Bachelor´s Degree Work deals with two optimization problems. The first of them is the optimization of quantity basic parts of trains on the predefined train route. The second optimization problem is to minimize walking distance for passengers travelling in the cars of higher quality. The first chapter of this thesis describes the main issues, an analysis of the actual situation is performed and the main mathematical models needed for solving the optimization problems are defined. The last chapters are dedicated to achieved results and comparing them with actual situation.

Obsah

Seznam použitých zkratek a značek

c_{ij} … přímé náklady [Kč],

d_{ij} … skutečnost, zda je možné po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ další spoj $j = 1, \dots, n$ obsloužit v téže nebo v některé z následujících period,

d_{jl} … docházková vzdálenost cestujících vyšší kvality ve stanici $l = 1, \dots, q_l$ k příslušnému vozu na pozici $j = 1, \dots, r_2$ [m],

i … označení typu vozu,

j … označení pozice v kmenové části soupravy,

k … označení spoje v úloze o optimalizaci řazení kmenové části soupravy, označení nepřímých nákladů v úloze o optimalizaci oběhů,

l … označení stanice,

m … označení typu vozu v úloze o optimalizaci řazení kmenové části soupravy,

n … počet spojů v úloze o optimalizaci oběhů, označení typu vozu v úloze o optimalizaci řazení kmenové části soupravy,

p_{kl} … poptávka cestujících vyšší kvality po spoji $k = 1, \dots, r_3$ ve stanici $l = 1, \dots, q_l$,

q_l … počet stanic na trase spoje l,

r_1 … počet typů vozů,

r_2 … počet pozic v kmenové části vlaku,

r_3 … počet spojů na obsluhované trase,

x_{ij} … rozhodnutí o umístění vozu typu $i = 1, \dots, r_1$ na pozici $j = 1, \dots, r_2$ nebo rozhodnutí o přesunu kmenové části soupravy po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ k obsluze spoje $j = 1, \dots, n$.

1. Úvod

Železniční doprava se stává v posledních letech stále více atraktivní, a tak poptávka po tomto druhu přepravy nezadržitelně narůstá. V souvislosti s plánováním nabídky přepravních služeb musí železniční dopravce provozující osobní dopravu řešit mnoho problémů. Jedním z nich je také problém řazení vozů ve vlakových soupravách.

Pokud tomuto, ač na první pohled nevýznamnému problému nebude věnována dostatečná pozornost, může nastat situace, ve které by zákazníci nemuseli být s průběhem přepravy a poskytnutými službami spokojeni, a trend poptávky po přepravních službách nabízených daným dopravcem by mohl mít klesající tendenci. Zákazníci by tedy mohli na železnici začít hledat jiného dopravce, u kterého by byla přeprava z jejich pohledu pohodlnější, a to i za předpokladu vyšší ceny za její uskutečnění. Dopravce musí přihlížet také k tomu, že v dnešní době, a bude tomu samozřejmě i nadále v budoucnosti, jsou zákazníci stále náročnější a požadavky na přepravu a služby v jejím průběhu jsou mnohonásobně vyšší, než tomu bývalo dříve.

Plán řazení musí např. přihlížet i k tomu, aby zákazníci cestující ve třídách, které poskytují cestujícím vyšší komfort v průběhu přepravy, byli před ostatními cestujícími upřednostňováni, a to jak rozsahem poskytovaných služeb při vlastní jízdě vlaku, tak již při úvodních fázích přepravy zahrnující mimo jiné také nástup do vozu a také v závěrečných fázích přepravního procesu, tzn. při výstupu z železničního vozu.

V případě, že budou do soupravy zařazovány další vozy, musí být také zohledněn fakt, aby ve výchozí stanici byl v určitý čas připraven předepsaný počet těchto vozů.

Železničního dopravce, na rozdíl od zákazníků, nezajímá pouze jejich spokojenost s přepravou, ale také náklady vynaložené na realizaci této přepravy, které by měly být co nejnižší. Železniční dopravce tak musí hledat efektivní řešení z pohledu vynaložených nákladů při zachování definovaných standardů poskytovaných služeb.

Cílem bakalářské práce je zabývat se problematikou řazení soupravy vybraného železničního dopravce s přihlédnutím k výše uvedeným zásadám.

2. Obecná charakteristika problému – faktory ovlivňující řazení souprav

V této kapitole budou nastíněny zejména nejdůležitější faktory, které problematiku řazení vozu v soupravách ovlivňují.

V rámci analýzy a následného nového návrhu systému řazení vlakové soupravy pro osobní dopravu musí být zohledněny tři základní aspekty.

Tím prvním a zároveň nejdůležitějším faktorem je rozsah řadících prací spojených se sestavou souprav vlaku. Tím nejjednodušším řešením je vytvoření takové skupiny vozů, která bude neměnná pro všechny spoje. Taková neměnná skupina vozů bude v dalším textu práce označována termínem „kmenová část soupravy“. Kmenovou část soupravy bude v případě potřeby, tzn. v období zvýšené poptávky, nutno doplnit o další osobní vozy, a to nejlépe buď na začátek či na konec vlaku (dále posilové vozy).

Za další aspekt ovlivňující řazení vozů v soupravě může být považována také vzdálenost, kterou musejí cestující absolvovat například od podchodu, nadchodu či přechodu ke konkrétnímu vozu, ve kterém mají rezervované místo. Přitom lze zohlednit zejména tu skupinu zákazníků, jež preferují přepravu ve vozech či vozových oddílech vyšší kvality a jsou ochotni zaplatit také odpovídající vyšší přepravné podle stanoveného tarifu. Celková absolvovaná vzdálenost však nezávisí pouze na vzdálenosti místa nástupu/výstupu do vozu od místa vstupu/opuštění nástupiště, ale také na tom, kolik cestujících ji musí v dané stanici absolvovat. Prostřednictvím tohoto počtu cestujících se také vystihne důležitost dané stanice.

Musí být brán zřetel také na fakt, že osobní železniční vozy, jejichž interiér je přizpůsoben přepravě s vyššími nároky cestujících, musí být řazeny tak, aby co nejčastěji zastavovaly ve všech stanicích a zastávkách u nástupiště, tzn., aby zákazníci cestující v nich nebyli nuceni při nástupu a výstupu používat jiné vozy, zejména vozy nižší kvality.

Některé problémy zmíněné v předchozím textu naplňují znaky specifické třídy problémů, které jsou označovány jako optimalizační problémy. Jsou to:

a) optimalizace oběhů kmenových částí vlaků (vhodným optimalizačním kritériem je součet celkových nákladů na neproduktivní přejezdy kmenových částí vlaků a nákladů na celkový počet nasazených kmenových částí do jednotlivých oběhů),
b) optimalizace umístění vozů vyšší kvality v kmenové části vlakové soupravy (vhodným optimalizačním kritériem je celková docházková vzdálenost pro zákazníky cestující ve vozech vyšší kvality).

Z uvedeného důvodu bude následující text věnován problematice optimalizačních metod vhodných pro řešení definovaných problémů.

3. Teoretická východiska řešení

Optimalizační modely mohou být rozděleny podle celé řady hledisek. Nejčastěji se ke kategorizaci používají hlediska:

a) vlivu času,

b) charakteru vstupních veličin.

Z hlediska vlivu času členíme modely na statické, jež jsou vhodné pro konkrétní situaci a nezahrnují vliv času, a dynamické, které vliv času zahrnují. Z hlediska charakteru vstupních veličin se matematické modely dělí na deterministické a stochastické. Deterministické modely dělíme dále na lineární, u nichž jsou veškeré podmínky a účelová funkce vyjádřeny lineárními rovnicemi či nerovnicemi, a nelineární, ve kterých se vyskytuje alespoň jeden nelineární vztah, ať již v účelové funkci nebo v omezujících podmínkách.

Při řešení definovaných problémů se jako vhodné optimalizační modely jeví lineární deterministické modely, neboť lineární modely jsou primárně určeny pro řešení rozhodovacích úloh plánovacího charakteru s dlouhodobějším časovým horizontem, což je v případě plánování řazení vozů v soupravách vlaku i oběhů kmenových částí souprav jednoznačně splněno. Základní výhodou lineárních modelů je garance nalezení optimálního řešení i v rozsáhlých úlohách, je-li k dispozici dostatečný výpočetní výkon a dostatečná doba k řešení úlohy.

Oblast aplikované matematiky zabývající se problematikou tvorby a řešení lineárních deterministických modelů se nazývá lineární programování.

Lineární programování je tvořeno skupinou exaktních postupů a, jak již bylo uvedeno, zpravidla zaručujících nalezení optimálního řešení. Základem řešení úlohy s využitím lineárního programování je vytvoření matematického modelu úlohy. Optimalizační model se v obecné rovině skládá ze dvou částí – soustavy omezujících podmínek a optimalizačního kritéria.

Soustava omezujících podmínek vymezuje množinu přípustných řešení úlohy. Omezující podmínky mohou být dvojího druhu (strukturální a obligatorní) a vymezují množinu všech přípustných řešené úlohy. Strukturální podmínky vymezují reálná omezení a v případě potřeby vytvářejí požadované logické vazby mezi proměnnými, obligatorní podmínky pak vymezují definiční obory použitých proměnných. Optimalizační kritérium reprezentuje veličinu, pomocí které lze posoudit kvalitu jednotlivých přípustných řešení a je nedílnou součástí vytvářeného modelu. Je-li navíc formulováno jako funkční vztah, hovoří se o účelové funkci.

V úlohách lineárního programování se rozlišují dva druhy dat. První typ dat tvoří data známá již před započetím řešení dané úlohy, která jsou během výpočtu neměnná – konstanty. Druhý typ dat tvoří hodnoty veličin, jejichž hodnoty lze v průběhu výpočtu měnit – proměnné. Hodnoty proměnných nejsou před zahájením řešení úlohy konkretizovány, každá proměnná je na začátku řešení vymezena pouze svým definičním oborem.

V lineárním programování se rozlišují tři základní typy definičních oborů – množina nezáporných čísel, množina celých nezáporných čísel a množina zahrnující pouze hodnoty 0 a 1 (tzv. bivalentní proměnné). Množina nezáporných a celých nezáporných čísel může být využita např. pro časové údaje. Bivalentní proměnné zpravidla vyjadřují skutečnost, že nějaké rozhodnutí nabylo kladného či záporného významu. Pokud nastalo kladné rozhodnutí, bývá modelováno hodnotou 1, v opačném případě hodnotou 0.

Při řešení úlohy lineárním modelem mohou nastat tři situace. Buď je v úloze nalezeno jedno, nebo více optimálních řešení (v úlohách tzv. spojitého lineárního programování může být optimálních řešení také nekonečně mnoho), nebo řešená úloha žádné optimální řešení nemá, jelikož nelze splnit všechna zadaná omezení současně, nebo optimální řešení nelze najít z důvodu neohraničení množiny přípustných řešení ve směru optimalizace.

3.1. Optimalizace řazení vozů v kmenové části soupravy

Pojem „kmenová část soupravy“ byl zmíněn již v kapitole 2 této bakalářské práce, jejím dalším cílem je tedy vytvořit zcela nový matematický model pro optimální řazení vozů v kmenové části vlakové soupravy s přihlédnutím důležitosti jednotlivých stanic na obsluhované trase. Bylo také zmíněno, že důležitost obsluhovaných uzlů je podmíněna počtem cestujících využívajících danou stanici a docházkovou vzdáleností, kterou musejí cestující absolvovat pro dosažení konkrétního železničního vozu.

3.1.1. Obecná formulace problému o optimalizaci řazení vozů vyšší kvality v kmenových částech vlakové soupravy

Železniční dopravce má k dispozici r_1 typů vozů, ze kterých potřebuje vytvořit soupravu o r_2 vozech. Předpokládejme, že některý typ vozu je označen jako vůz vyšší kvality. Železniční dopravce obsluhuje r_3 spojů, které zajišťují přepravu mezi jednotlivými železničními uzly. Mezi těmito uzly, které jsou pro dané spoje výchozími a cílovými stanicemi, se nacházejí také stanice nácestné. Každá ze stanic se liší jak svým uspořádáním ze stavebního hlediska, tak důležitostí na obsluhované trase. Uspořádáním ze stavebního hlediska je myšleno zejména umístění nadchodů, podchodů či přechodů v rámci nástupiště (publikovány v [2]) a z důvodu této variability je také různá docházková vzdálenost od míst vstupů/odchodů na/z nástupiště v jednotlivých stanicích.

Docházková vzdálenost bude v dalším textu označována d_{jl}, což je konstanta vyjadřující absolvovanou vzdálenost jedním cestujícím využívající přepravu ve vozech vyšší kvality ve stanici $l = 1, \dots, q_l$ (obecný index l u symbolu q je zaveden z toho důvodu, že počty obsluhovaných stanic se u jednotlivých spojů liší), je-li vůz vyšší kvality řazen na pozici $j = 1, \dots, r_2$. Důležitostí stanice se pak rozumí počet cestujících, které danou stanici využívají. Tato důležitost vychází z poptávky cestujících využívající přepravu ve vozech vyšší kvality ve stanici k po spoji l a bude dále značena p_{kl}. Úkolem je rozhodnout o zařazení jednotlivých typů vozů na jednotlivé pozice v kmenové části soupravy tak, aby se minimalizovala celková docházková vzdálenost cestujících požadujících přepravu ve vozech vyšší kvality.

Za účelem modelování rozhodnutí se do úlohy zavedou proměnné x_{ij}. Jako vhodný definiční obor proměnných se na základě modelovaného rozhodnutí jeví definiční obor obsahující hodnoty 0 a 1. Když $x_{ij} = 1$, potom vůz typu $i = 1, \dots, r_1$ bude zařazen na pozici $j = 1, \dots, r_2$. Pokud je $x_{ij} = 0$, znamená to opak. V níže uvedeném modelu se předpokládá stejný počet pozic a počet typů vozů v každé kmenové části vlaku.

3.1.2. Obecný matematický model pro optimalizaci řazení vozů vyšší kvality v kmenových částech vlakové soupravy

Rekapitulace symbolů použitých v matematickém modelu a jejich významu:

r_1 … počet typů vozů,

r_2 … počet pozic v kmenové části vlaku,

r_3 … počet spojů na provozované síti,

q_l … počet stanic na trase spoje l,

d_{jl} … docházková vzdálenost cestujících vyšší kvality ve stanici $l = 1, \dots, q_l$ k příslušnému vozu na pozici $j = 1, \dots, r_2$ [m],

p_{kl} … poptávka cestujících vyšší kvality po spoji $k = 1, \dots, r_3$ ve stanici $l = 1, \dots, q_l$,

x_{ij} … rozhodnutí o umístění vozu typu $i = 1, \dots, r_1$ na pozici $j = 1, \dots, r_2$.

Matematicky model pro optimalizaci řazení vozů vyšší kvality v kmenových částech vlakové soupravy má tvar:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{r_1} \sum_{j=1}^{r_2} \sum_{k=1}^{r_3} \sum_{l=1}^{q_l} d_{jl} \cdot p_{kl} \cdot x_{ij} \tag{3.1}$$

za podmínek:

$$\sum_{j=1}^{r_2} x_{ij} = 1 \qquad pro\ i = 1, \dots, r_1 \tag{3.2}$$

$$\sum_{i=1}^{r_1} x_{ij} = 1 \qquad pro\ j = 1, \dots, r_2 \tag{3.3}$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \qquad pro\ \ i = 1, \dots, r_1\ ;\ j = 1, \dots, r_2 \tag{3.4}$$

Výraz (3.1) představuje účelovou funkci – celkovou vzdálenost, kterou musí absolvovat cestující využívající vozy vyšší kvality. Skupina podmínek (3.2) reprezentuje, že každý typ vozu $i = 1, \dots, r_1$ je možné umístit právě na jednu pozici $j = 1, \dots, r_2$. Skupina podmínek (3.3) zajišťuje, že každé pozici $j = 1, \dots, r_2$ je možné přiřadit právě jeden typ vozu $i = 1, \dots, r_1$. Skupina podmínek (3.4) vymezuje definiční obory proměnných x_{ij} .

V reálné dopravní praxi může být například požadováno, aby některé typy vozů byly řazeny vedle sebe nebo aby vozy stejného typu vedle sebe řazeny nebyly. První případ nastává například v situaci, kdy obsluha vozu vyšší kvality musí být provedena co nejdříve, a proto musí být zajištěno, aby byl vedle něj řazen vůz se skladovacími prostory pro personál. Druhý případ nastává v situaci, kdy jsou k dispozici vozy se skladovacími prostory a obsluha z nich (jsou-li řazeny za sebou) by byla v rámci celé kmenové části vlaku příliš zdlouhavá.

Za účelem zapracování doplňujících omezení uvažujme dva typy vozů v dalším textu označených indexy m a n. Nejdříve bude ošetřen případ, kdy je vyžadováno splnění prvního doplňujícího omezení, tzn., aby vůz typu n byl řazen vedle vozu typu m. Omezující podmínka musí mít dva tvary, neboť je nutno rozlišovat, zda je vůz typu m řazen na krajní pozici kmenové části nebo uprostřed. Je-li uvažováno, že počet pozic v kmenové části vlakové soupravy je r_2, pak omezující podmínka pro řazení vozu typu m na krajní pozici kmenové části, bude mít tvar:

$$x_{m1} \leq x_{n2} \tag{3.5}$$

$$x_{mr_2} \leq x_{nr_2-1} \tag{3.6}$$

a v případě, že vůz typu m bude řazen uprostřed soupravy, bude mít podmínka tvar:

$$x_{mj} \leq x_{nj-1} + x_{nj+1} \qquad pro\ j = 2, \dots, r_2 - 1 \tag{3.7}$$

Protože před začátkem řešení není zřejmé, zda je výhodnější zařadit vůz typu m na krajní pozici soupravy nebo doprostřed kmenové části vlakové soupravy, musí být v modelu zapsány všechny tři podmínky. To je možné, neboť podmínky se vzájemně nevylučují.

Druhý případ nastává v situaci, kdy vozy stejného typu není vhodné řadit vedle sebe. Nechť je vůz typu m zařazen na pozici j. Je-li např. požadováno, aby mezi vozy stejného typu byl alespoň jeden vůz jiného typu, potom budou mít podmínky tvar:

$$x_{mj} + x_{mj+1} \leq 1 \qquad pro\ j = 1, \dots, r_2 - 1 \tag{3.8}$$

Je-li požadováno, aby mezi vozy stejného typu byly alespoň dva vozy jiného typu, potom budou mít podmínky tvar:

$$x_{mj} + x_{mj+1} + x_{mj+2} \leq 1 \qquad pro\ j = 1, \dots, r_2 - 2 \tag{3.9}$$

3.2. Optimalizace oběhů kmenových částí vlaku

Dalším z cílů bakalářské práce je vytvořit matematický model oběhů kmenových částí vlaku. Za tím účelem je možno využít již existující model pro optimalizaci oběhu náležitostí publikovaný v [1].

Důvodem pro využití již existujícího modelu pro optimalizaci oběhu náležitostí je soulad řešené úlohy v oblastech vstupních dat, rozhodovacích proměnných a optimalizované veličiny.

3.2.1. Problém optimalizace oběhů náležitostí

V úvodu podkapitoly budou nejdříve definovány některé pojmy obsažené v použité literatuře.

Náležitostí rozumíme prostředek, díky kterému je možné realizovat jak přemisťování kompletu, tak i samotnou přepravu. Za náležitost bude pro potřeby řešené práce považována kmenová část soupravy. Harmonogram pohybu náležitostí v prostoru a čase nazýváme oběh. Oběh je vytvořen posloupností určitých spojů, které má tato náležitost obsloužit. Tato posloupnost současně určuje pohyb náležitostí, jež se postupně stávají součástmi několika různých kompletů obsluhujících různé spoje.

3.2.2. Obecná formulace problému o optimalizaci oběhů náležitostí

Je naplánováno n spojů, jimiž se pravidelně realizuje přemístění kompletů mezi dvojicemi různých uzlů. Každé konkrétní přípustné řešení je dáno některou permutací, která vyobrazuje přechod náležitostí mezi jednotlivými dvojicemi uvažovaných spojů.

$$P = \begin{pmatrix} s_1 & s_3 & s_5 & s_7 & \\ s_2 & s_4 & s_6 & s_8 & \cdots \end{pmatrix},$$

$s_{1,2,\dots,n}$ … označení jednotlivých spojů

Danou permutaci je pro názornost vhodné znázornit pomocí orientovaného grafu, jehož n vrcholů představuje počet spojů a orientované hrany pak přechody náležitostí mezi nimi. Orientovaný graf reprezentující permutace může být souvislý, jeho souvislost však není podmínkou (případ souvislosti grafu nastává, když jsou všechny spoje obsloužitelné v rámci jednoho oběhu). V každém případě platí, že v jednotlivých komponentech platí tzv. silná souvislost.

V dalším textu bude používáno pojmu perioda. Periodou se rozumí období, v nichž se spoje pravidelně opakují (zpravidla jeden den).

V případě, že se v orientovaném grafu vyskytují násobné hrany, potom reprezentují přechod náležitostí do následující periody. Když je délka jedné periody uvažována 24 hodin, tak obsluha dalšího spoje v situaci, kdy jsou vrcholy spojeny násobnými hranami, je umožněna až další den (po půlnoci předchozího dne). Orientovaný graf může být složen z více komponent. Každá komponenta grafu bude reprezentovat jeden oběh, to znamená, že v každé souvislé uzavřené komponentě grafu bude vždy minimálně jedna dvojice násobných hran.

Aby bylo možno stanovit počet náležitostí, jež jsou nezbytně nutné pro obsluhu daných spojů, zavede se do modelu veličina d_{ij}. Když se přesun náležitosti po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ uskuteční v rámci jedné periody, potom $d_{ij} = 0$, v opačném případě je $d_{ij} > 0$. Když $d_{ij} = 1$, potom jde o přechod do nejbližší následující periody. Pro přechody do časově vzdálenějších period se používají hodnoty $d_{ij} = 2$, $d_{ij} = 3$, atd.

Aby bylo možné provést optimalizaci, je nutno formulovat optimalizační kritérium reprezentující ocenění časově přípustných přesunů.

K ocenění časově přípustných řešení úlohy o obězích náležitostí jsou obecně k dispozici 2 typy vstupních údajů vytvořené pro každou dvojici spojů $i = 1, \dots, n$ a $j = 1, \dots, n$:

- matice (c_{ij}), která vyjadřuje výši přímých nákladů spojených s přechodem náležitostí ze spoje $i = 1, \dots, n$ na spoj $j = 1, \dots, n$,
- nepřímé náklady k za použití každé náležitosti v jedné periodě.

Přímé náklady, které jsou vyjádřeny maticí (c_{ij}), reprezentují náklady na celkové neproduktivně najeté kilometry. Nepřímé náklady k zahrnují vše, co souvisí s odpisy a režijními náklady s provozem vozidla.

V řešené úloze je nutno rozhodnout o přesunu náležitosti po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ k obsluze spoje $j = 1, \dots, n$ tak, aby celkové náklady na zabezpečení obsluhy všech spojů byly minimální.

Za účelem modelování rozhodnutí se do úlohy zavedou proměnné x_{ij}. Jako vhodný definiční obor proměnných se na základě modelovaného rozhodnutí jeví definiční obor obsahující hodnoty 0 a 1. Když $x_{ij} = 1$, potom k přesunu náležitosti po obsluze spoje i k obsluze spoje j dochází, pokud je $x_{ij} = 0$, znamená to opak.

3.2.3. Obecný matematický model pro optimalizaci oběhů náležitostí

Rekapitulace symbolů použitých v matematickém modelu a jejich významu:

$c_{ij} \dots$ přímé náklady [Kč],

$k \dots$ nepřímé náklady [Kč],

$n \dots$ počet spojů [-],

$d_{ij} \dots$ skutečnost, zda je možné po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ další spoj $j = 1, \dots, n$ obsloužit v téže nebo v některé z následujících period,

$x_{ij} \dots$ rozhodnutí o přesunu kmenové části soupravy po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ k obsluze spoje $j = 1, \dots, n$ (je-li $x_{ij} = 1$, potom k přesunu dochází, pokud je $x_{ij} = 0$, znamená to opak).

Matematický model pro optimalizaci oběhů náležitostí publikovány v [1] má tvar:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (c_{ij} + k \cdot d_{ij}) \cdot x_{ij} \tag{3.10}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad pro\ i = 1, \dots, n \tag{3.11}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad pro\ j = 1, \dots, n \tag{3.12}$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\} \qquad \begin{array}{c} pro\ \ i = 1, \dots, n\,; \\ j = 1, \dots, n \end{array} \tag{3.13}$$

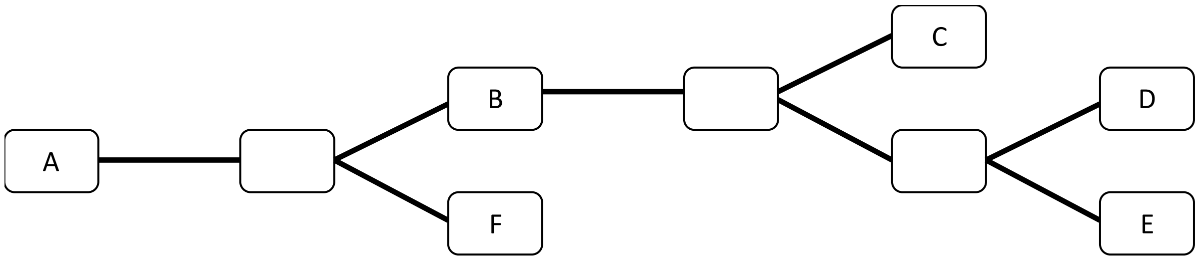
Výraz (3.10) představuje účelovou funkci – celkové náklady. Skupina podmínek (3.11) reprezentuje, že po obsluze každého spoje $i = 1, \dots, n$ se daná náležitost přesune k obsluze právě jednoho dalšího spoje $j = 1, \dots, n$. Skupina podmínek (3.12) zajišťuje, že k obsluze každého spoje $j = 1, \dots, n$ bude přidělena právě jedna náležitost. Skupina podmínek (3.13) vymezuje definiční obory pro proměnné x_{ij} .

4. Výpočetní experimenty

V předchozí kapitole byly zformulovány matematické modely pro řešení zadaných optimalizačních úloh – úlohy o optimálním řazení vozů v kmenové části vlakové soupravy a úlohy o optimalizaci oběhů kmenových částí souprav. Zformulované matematické modely budou v této části bakalářské práce využity pro předem definovanou síť tratí, na které je provozována zadaná množina spojů.

4.1. Síť spojů

Pro názornost je uvedeno zjednodušené schéma sítě (některé stanice, ve kterých vlaky zastavují, nejsou uvedeny, protože to z hlediska tvorby oběhů kmenových částí souprav není důležité) přičemž pokud je spoj vypravován ze stanice A do jedné ze stanic B, C, D, E či F, vždy k němu existuje spoj vedený v opačném směru. Na zadanou síť navazuje tabulka 1, která poskytuje informace o výchozích, cílových a významných nácestných stanicích pro jednotlivé vypravované spoje. Názvy výchozích, cílových a významných nácestných stanic jsou zapsány symbolicky, neboť dopravce nedovoluje uvádět jejich názvy.



Obrázek 1: Zjednodušené schéma sítě

4.2. Rozložení spojů na jednotlivé obsluhované trasy

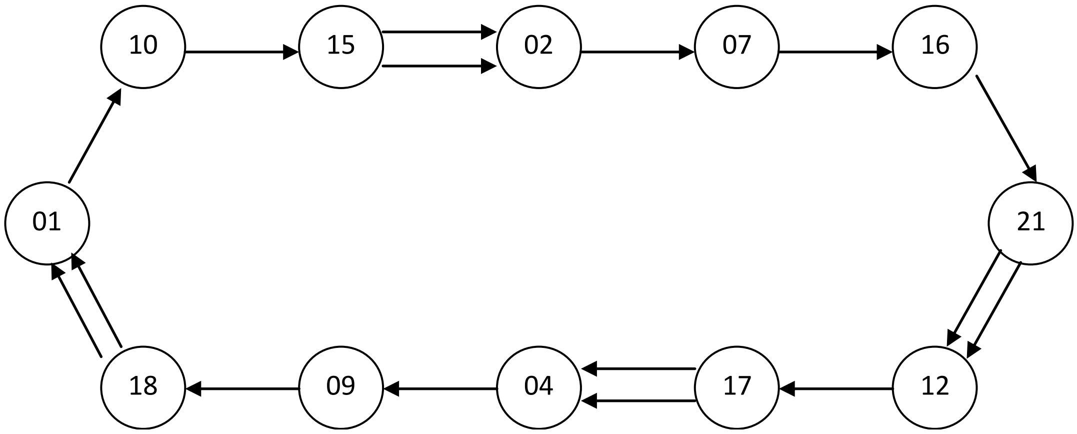
Realizace obsluhy naplánovaných spojů je uskutečněna v rámci čtyř oběhů, které budou zobrazeny níže v grafickém provedení pod tabulkou 1.

Číslo spoje	Výchozí stanice	Cílová stanice	Čas odjezdu	Čas příjezdu	Délka trasy
00 ⚒ 6	C	A	3:32	7:58	413 km
01 ⚒ 6	A	B	5:46	9:29	374 km
02	F	A	5:50	8:58	318 km
03	A	E	7:46	15:44	703 km
04	C	A	5:32	9:58	413 km
05	A	B	9:46	13:29	374 km
06	C	A	6:32	10:58	413 km
07	A	B	11:46	15:29	374 km
08	D	A	4:08	11:58	578 km
09	A	B	13:46	17:29	374 km
10	C / B	A	9:32 / 10:11	13:58	413 / 374 km
11	A	D	14:46	21:52	578 km
12	E	A	7:44	15:58	703 km
13	A	C	15:46	20:08	413 km
14	B	A	14:11	17:58	374 km
15	A	F	16:46	19:51	318 km
16	B	A	16:11	19:58	374 km
17	A	C	17:46	22:08	413 km
18	B	A	18:11	21:58	374 km
19	A	C	19:46	0:08	413 km
20	E	A	21:22	5:58	703 km
21	A	E	21:46	6:41	703 km

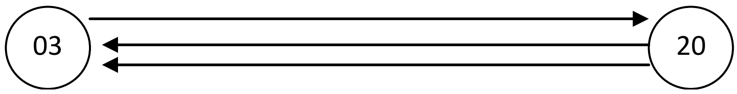
Tabulka 1: Údaje o spojích

Jak je patrné z tabulky 1, spoj 10 má dvě výchozí stanice. Ve stanici C zahajuje jízdu 1x týdně (v neděli), v ostatních dnech (pondělí až sobota) zahajuje jízdu ve stanici B.

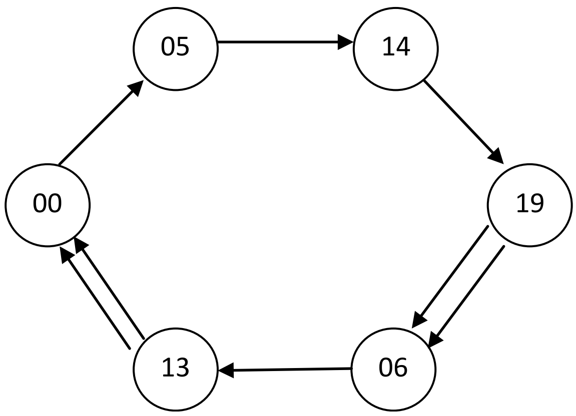
V současnosti platné jednotlivé oběhy jsou znázorněny na obrázcích 2-5, přičemž násobné hrany v komponentech grafu znázorňují přechody, v rámci kterých jsou následující spoje realizovány až v další periodě. Periodou je myšleno 24 hodin.



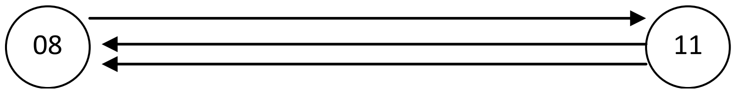
Obrázek 2: Grafické znázornění prvního oběhu



Obrázek 3: Grafické znázornění druhého oběhu



Obrázek 4: Grafické znázornění třetího oběhu



Obrázek 5: Grafické znázornění čtvrtého oběhu

4.3. Rozložení spojů do jednotlivých oběhů a řešení přesunů kmenových částí mezi jednotlivými oběhy v době předpokládané nižší poptávky

V předchozí podkapitole bylo graficky znázorněno, že obsluhované spoje jsou rozděleny do čtyř různých oběhů. K nim je v současné době zapotřebí osm kmenových částí vlakových souprav, které jsou nasazeny do provozu. Řazení jednotlivých kmenových částí je na všech čtyřech obězích neměnné a posilové vozy jsou této kmenové části přiděleny na základě poptávky po obsluhované trase v daném dni či denním období.

První oběh zajišťuje možnost přepravy mezi stanicemi A, B, C a F. Oběh obsluhující uvedené stanice je rozvržen tak, aby byl realizován ve čtyřech po sobě jdoucích dnech, během nichž bude zajištěno 12 pravidelných spojů.

Jelikož tatáž kmenová část vlakové soupravy je schopna těchto 12 spojů obsloužit ve čtyřech po sobě jdoucích dnech, je nutné, aby počet kmenových částí nasazených na daném oběhu byl rovný počtu dní, ve kterých se má daný oběh realizovat. Kmenová část vlakové soupravy, která tedy začne prvním dnem obsluhou spoje 01, může být na tentýž spoj vypravena znovu až pátým dnem. Výjimkou během týdne je pak pouze neděle, kdy dochází k tomu, že spoj 01 není vzhledem k předpokládané nízké poptávce vypravován. Po obsluze sobotního spoje 18 (poslední spoj na prvním oběhu) tedy následuje přesun dané kmenové části vlakové soupravy z prvního oběhu na oběh třetí ke spoji 05.

Ve třetím oběhu nastává analogická situace. V neděli není z důvodu předpokládané nízké poptávky vypravován ze stanice C do stanice A spoj 00, a tak prvním nasazeným spojem je v tento až spoj 05, jehož výchozí stanice je stanice A. Aby nebylo zapotřebí vypravovat speciální soupravový vlak pro realizaci spoje 05, je kmenová část soupravy, která v sobotu končí obsluhu spoje 13, přesunuta na oběh první, kde zahájí další den obsluhu spoje 10. Na třetí oběh je nutno nasadit dvě kmenové části soupravy, neboť oběh zahrnuje obsluhu 6 spojů realizovaných během dvou po sobě jdoucích dnech.

4.4. Charakteristika vozového parku tvořícího kmenovou část vlakové soupravy

V rámci komfortu a zajištění maximální spokojenosti všech zákazníků žádajících o přepravu na řešené síti jsou kmenové části vlaků složeny z vozů velkoprostorových, oddílových a kombinovaných a počty jednotlivých typů vozů by se měly odvíjet od dlouhodobé poptávky a podle ní by tak měla být kmenová část vlakové soupravy neměnná.

Aby byl dopravce schopen zajistit maximální spokojenost všech cestujících, je samozřejmě nutné rozdělit kmenovou část vlakové soupravy podle jednotlivých kategorií, resp. tříd, které se liší jak cenou, tak i rozsahem poskytovaných služeb. Je nutné, aby každá kmenová část vlakové soupravy zahrnovala vozy všech tříd a typů vozů. Tím bude v každém spoji zajištěn stejný rozsah přepravních poskytovaných služeb během přepravy.

V následujících podkapitolách tak budou detailněji charakterizovány jednotlivé typy vozů, které má dopravce zařazeny ve svém vozidlovém parku a jejich vybavení z hlediska nabízených služeb.

4.4.1. Vůz typu X

Cestování vozem typu X nabízí pro zákazníky možnost volby strávení své cesty v oddílovém a nově také ve velkoprostorově řešeném železničním voze. Obě řešení vozů typu X slouží zejména pro nenáročné cestující (cestování v něm je možné pořídit za nejnižší možnou cenu).

Oddílový vůz kategorie X nabízí šest míst v jednom kupé, zásuvky s napětím 230 V, kožené či plyšové sedačky, které jsou pro zajištění maximální pohodlnosti také polohovatelné stejně jako podhlavníky montované nad nimi.

V tomto typu železničního vozu je možné vybrat si také tichý oddíl, kde musejí cestující respektovat přísnější požadavky na omezení hlučnosti, a dětský oddíl uzpůsobený především pro cestování s malými dětmi. Počet míst k sezení v těchto speciálních oddílech je totožný jako v "normálních" oddílech kategorie X.

Tichý oddíl je na rozdíl od dětského přizpůsoben pro cestující, kteří mají v plánu si během své cesty odpočinout nebo si v klidu připravovat svou práci. Zde je také omezeno používání elektronických zařízení, která by mohla jakýmkoliv způsobem narušit cestu spolucestujících v daném kupé. Z tohoto důvodu není povoleno používání mobilních telefonů, poslouchání hlasité hudby či telefonické hovory, dále je zakázáno sledovat filmy, videa atp. bez použití sluchátek. Tento druh oddílu nalezneme jak ve vozu typu X, tak i ve vozu typu Z, jenž nabízí nejvyšší komfort a pohodlí (viz text uvedený níže). V rámci vozu typu X je klidová zóna zavedena jak v určitých oddílech umístěných vždy zpravidla na konci železničního vozu.

Celý železniční vůz má pak při devíti oddílech celkovou kapacitu 54 volných míst, při snížené kapacitě, která je ovlivněna umístěním skladovacích prostor pro personál a kuchyňkami, je celková kapacita snížena na 48 míst (osm oddílů).

V nově řešeném velkoprostorovém voze typu X (80 míst) je klidová zóna zavedena v celé délce. Jedná o první železniční vůz v Evropě, ve kterém jsou zabudované dotykové obrazovky s multimediálním systémem přímo v kožených sedačkách. Na rozdíl od oddílových vozů, kde jsou zásuvky s napětím 230 V umístěny pouze u sedadel umístěných u oken a z tohoto důvodu jsou dostupné pouze určitým cestujícím, je ve velkoprostorovém voze umožněno využít tuto zásuvku u každého sedadla. Moderní interiér vozu je vybaven také informačním systémem, který je umístěn v horní části středové uličky, aby byl viditelný.

4.4.2. Vůz typu Y+Z

Někteří zákazníci jsou ovšem na přepravu, poskytované služby a komfort náročnější a vůz typu X jim nevyhovuje. Z tohoto důvodu nabízí železniční dopravce také kombinované vozy, do nichž jsou zakomponovány hned dvě vyšší kategorie. V této třídě jsou k nalezení již jen kožené sedačky a pro práci jsou k dispozici velké stolky. Ty mají výhodu v tom, že jsou dostupné také cestujícím, kteří mají své místo blíže středové uličce, nikoliv pouze těm, kteří mají rezervované místo u okna. Kategorie Y je řešena jako velkoprostorový oddíl, ale v rámci jednoho železničního vozu je ještě kombinovaná s kategorií Z, která je dostupná zákazníkům již jen jako oddílová část. Kategorie Y nabízí 32 míst k sezení, vyšší kategorie Z již jen o polovinu méně.

Polohovatelné sedačky a podhlavníky jsou k dispozici i v těchto kategoriích a zajišťují jistý komfort a pohodlnost při cestování, při přepravě na velké vzdálenosti (např. A – E a zpět). Zejména v nočních hodinách mohou být ale již docela nepraktické a vzhledem k únavě cestujících také nepohodlné. Na základě připomínek a žádostí jednotlivých cestujících tak železniční dopravce nově zajišťuje na nejdelší trase v nočních hodinách řazené lehátkové a lůžkové vozy. Vzhledem k tomu, že tímto krokem došlo k navýšení počtu vozů, je také nezbytně nutné zařadit jiný typ lokomotivy, která je pro danou trasu, délku a hmotnost soupravy uzpůsobena.

4.4.3. Lehátkové a lůžkové vozy

Lehátkové vozy jsou pro zákazníky cestující v nočních hodinách vzhledem k vozům lůžkovým samozřejmě výhodnější variantou, jelikož přepravu v nich je možné realizovat za nižší cenu. Tyto železniční vozy jsou rozděleny do devíti oddílů po šesti lehátkách.

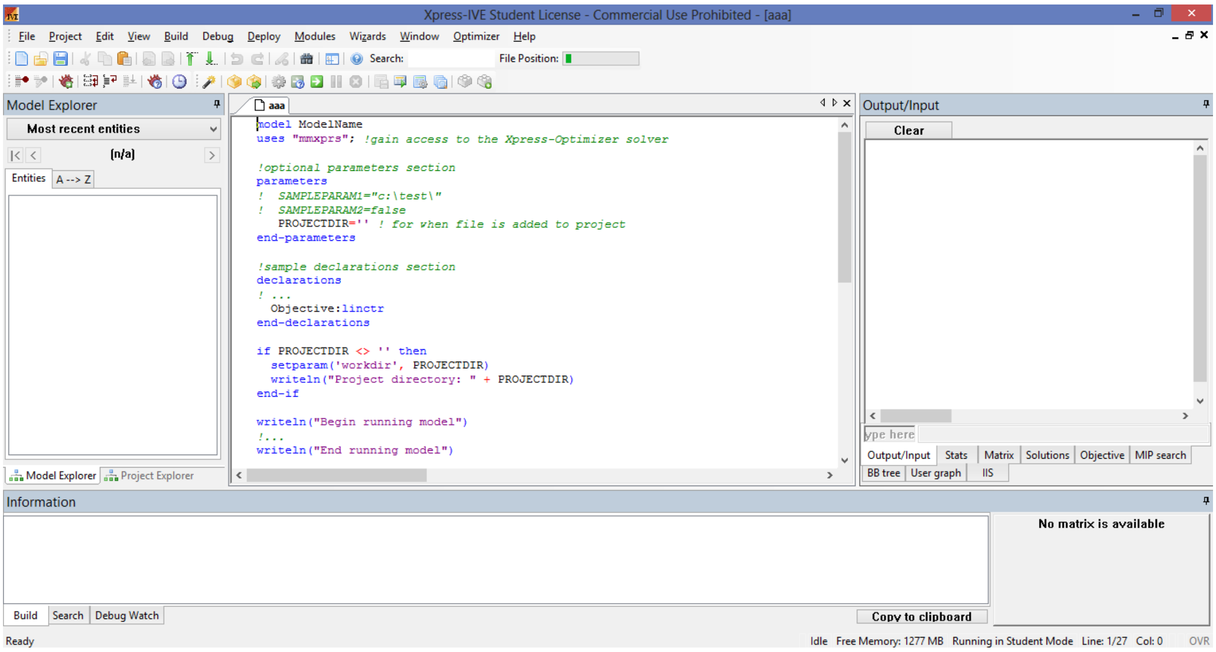
Lůžkové vozy naproti tomu zajišťují komfortní oddíly uzpůsobené jak pro sezení, tak spánek během cesty. Kapacita je ale poloviční než u lehátkových vozů. Dopravce navíc nabízí možnost rezervace celého oddílu jen pro jednoho či dva cestující, čímž samozřejmě roste zákazníkova spokojenost a soukromí během cesty.

5. Řešení zformulovaných modelů

Pro řešení zformulovaných modelů lze použít celou řadu optimalizačních software. V předložené práci bude k řešení navržených modelů využit optimalizační software Xpress - IVE. Ten je schopen vyřešit lineární matematické modely, je určený pro operační systém Windows a pro vyřešení daného problému užívá programovací jazyk MOSEL.

Pokud je navržený model správně transformován do textu programu, model neobsahuje logické nedostatky a je k dispozici dostatečně výkonné hardwarové vybavení, potom software Xpress-IVE nalezne optimální řešení (pokud existuje) pro zformulované optimalizační úlohy.

Pracovní prostředí optimalizačního software Xpress – IVE, se kterým bude pracováno, má následující podobu, viz obrázek 6:



Obrázek 6: Pracovní prostředí optimalizačního software Xpress – IVE

Jak je patrné z obrázku 6, v horní části nalezne uživatel software Xpress roletové menu, pod nímž se nachází panel nástrojů a ovládací panel. Ve střední části jsou viditelná tři okna. Okno po levé straně disponuje přehledem prvků, které v daném modelu vystupují a okno po pravé straně pak po ukončení výpočtu (požádá-li si o to tvůrce programu v textu programu) slouží pro výpis nalezeného optimálního řešení. Prostřední část obrazovky zahrnuje pracovní plochu, která je pak určena pro zapisování textu optimalizačního programu. Pod těmito třemi okny se nachází stavový řádek, který udává informace o správnosti textu programu, případně slouží k identifikaci nedostatků v textu programu.

Každý matematický model řešený v optimalizačním programu Xpress – IVE má jednotnou strukturu a skládá se z několika částí.

Nejprve je nutné zadat název modelu. Ten by měl být pro optimalizační program napsán bez diakritiky, a pokud je název složen z více slov, které uživatel vyžaduje pro přehlednost zapsat odděleně, je nezbytné jednotlivá slova od sebe oddělit podtržítkem. Před název programu se udává ještě klíčové slovo $model$ sloužící k formálnímu zahájení textu programu.

$$model\ obehy\_kmenu$$

Druhý řádek textu programu obsahuje následující zápis příkazu:

$$uses\ "mmxprs";$$

V programu je také možné pomocí speciálního příkazu vložit do textu jakékoliv poznámky, které jsou určeny pouze pro potřeby uživatele, a v nichž již nejsou kladeny žádné požadavky na diakritiku apod., jako tomu bylo u příkazů výše zmíněných. Poznámky do textu programu se zadávají následovně:

$$!\,poznámka\ pro\ uživatele$$

Po úvodu následuje deklarační část, kde je nezbytné identifikovat všechny konstanty typu pole a všechny proměnné. Veličinami typu pole se rozumí matice, vektory apod. V modelu je veličinou typu pole každá veličina, která využívá indexů, např. c_{ij}, d_{ij} apod. Deklarační část začíná klíčovým slovem:

$$declarations$$

Pro správnou identifikaci toho, zda se jedná o konstantu či proměnnou, se využívá zadaného označení. Pro konstanty typu pole se využívá označení $of\ real$ a pro proměnné typu pole označení $of\ mpvar$. Po zadání jakékoliv veličiny typu pole je vyžadováno zapsat klíčové slovo $array$. Zápis konstant a proměnných typu pole v námi řešené úloze je následující:

$$c: array(spoj, spoj) of\ real$$

$$d: array(spoj, spoj) of\ real$$

$$x: array(spoj, spoj) of\ mpvar$$

Deklarační část je uzavřena klíčovým slovem:

$$end - declarations$$

Po deklarační části následuje část, v níž se zadávají vstupní hodnoty pro výše uvedené konstanty. To bude provedeno následujícím způsobem:

$$c::[\,]$$

$$d::[\,]$$

přičemž do hranatých závorek se zapíší konkrétní hodnoty prvků matic.

Prohibitivní konstantu (obecně konstantu, která není typu pole) použitou v účelové funkci (obecně v matematickém modelu) je nutno definovat následujícím způsobem:

$$k := 100000$$

Nedílnou součástí každého modelu je soustava omezujících podmínek, která pro řešenou optimalizační úlohu o optimalizaci oběhů kmenových částí souprav má tvar:

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad pro\ i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \qquad pro\ j = 1, \dots, n$$

V optimalizačním programu pak zápis takových podmínek vypadá následovně:

$$forall\ (i\ in\ spoj)\ sum\ (j\ in\ spoj)\ x\ (i,j)\ =\ 1$$

$$forall\ (j\ in\ spoj)\ sum\ (i\ in\ spoj)\ x\ (i,j)\ =\ 1$$

Zbývá ještě doplnit zápisy tzv. obligatorních podmínek, tedy podmínek vymezujících definiční obory proměnných. Bivalentní proměnné použité v řešené úloze se definují následovně:

$$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj) x\ (i,j)\ is\_binary$$

Kdyby proměnná $x\ (i,j)$ měla nabývat nezáporných celočíselných hodnot, potom se bude definovat následovně:

$$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj) x\ (i,j)\ is\_integer$$

Poslední možností je pak situace, kdy je proměnná nezáporná, a v tomto případě pak pro ni není definován speciální příkaz, protože optimalizační software má nezápornost proměnných předdefinovánu. Kdyby však přes tento fakt uživatel chtěl definiční obor – množinu nezáporných čísel do textu programu zapsat, potom má možnost požít zápisu:

$$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj) x\ (i,j) >= 0$$

Po zadání daných podmínek do textu programu je již možno zapsat účelovou funkci. Jedna z funkcí zformulovaných v předložené práci je například:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (c_{ij} + k \cdot d_{ij}) \cdot x_{ij}.$$

Účelovou funkci, v níž minimalizujeme celkové náklady, pak do programu Mosel zapíšeme následujícím způsobem:

$$celkove\_naklady := sum\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj)\ (c\ (i,j) + k * d\ (i,j)) * x(i,j)$$

Pro optimalizaci jakéhokoliv problému hledáme zpravidla extrém (minimum, maximum) dané funkce, a tak je nutné i tento extrém do textu programu definovat. Minimalizaci a maximalizaci dané funkce zapíšeme do textu programu následovně:

$$minimize\ (celkove\_naklady)$$

$$maximize\ (zisk)$$

Poslední částí textu programu je část požadující provedení výpisu výsledků, které se zobrazí v okně na pravé straně pracovního prostředí. K vypsání výsledných hodnot optimalizačního výpočtu se používají dva příkazy - $getobjval$ a $getsol$. Příkaz $getobjval$ definuje požadavek na vypsání hodnoty účelové funkce a příkaz $getsol$ definuje požadavek na výpis proměnných, případně hodnot jiných výrazů, které proměnné obsahují. Pro řešený problém optimalizace počtu kmenových částí v obězích vypadá zápis v textu programu takto:

$$writeln\ ("celkove\ naklady\ jsou\ ", getobjval, "\ Kč")$$

$$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj | getsol(x(i,j)) > 0)\ writeln("x(", i, ",", j, ") = ", getsol\ (x\ (i,j)))$$

$$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj | getsol(x(i,j)) > 0)\ writeln("d(", i, ",", j, ") = ", getsol\ (d\ (i,j)))$$

Text programu se vždy uzavře klíčovým slovem:

$$end - model$$

V následující kapitole budou prezentována konkrétní vstupní data pro jednotlivé optimalizační výpočty a budou prezentovány výsledky dosažené na základě optimalizačních výpočtů.

6. Příprava vstupních údajů pro optimalizační výpočet a jeho realizace

6.1. Vstupní údaje pro optimalizační výpočet úlohy o optimalizaci kmenových částí souprav

Aby bylo možné realizovat optimalizační výpočet a získat tak optimální řešení daného matematického modelu lineárního programování, je nezbytně nutné mít k dispozici vstupní údaje vyžadované matematickými modely. Pro první řešenou optimalizační úlohu (optimalizaci kmenových částí souprav) jsou k dispozici podklady zahrnující celkové neproduktivně najeté kilometry a informace o možnosti přesunů kmenových částí souprav v rámci periody. Druhá optimalizační úloha pak vyžaduje vstupní údaje obsahující počty cestujících využívající danou stanici a docházkové vzdálenosti, které musí být v daných stanicích cestujícími absolvovány.

6.1.1. Příprava vstupních údajů pro optimalizační úlohu č. 1 – oběhy kmenových částí souprav

V současné době je dle grafikonu vlakové dopravy na řešené síti k dispozici jedenáct párů vypravovaných spojů. V tabulce 2 budou znázorněny neproduktivně najeté kilometry, které musí kmenová část soupravy absolvovat po obsluze spoje $i = 1, \dots, n$ k obsluze spoje $j = 1, \dots, n$.

i/j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
1	39	374	147	374	39	374	39	374	204	374	0	374	329	374	0	374	0	374	0	374	329	374
2	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
3	290	704	476	704	290	704	290	704	233	704	329	704	0	704	329	704	329	704	329	704	0	704
4	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
5	39	374	147	374	39	374	39	374	204	374	0	374	329	374	0	374	0	374	0	374	329	374
6	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
7	39	374	147	374	39	374	39	374	204	374	0	374	329	374	0	374	0	374	0	374	329	374
8	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
9	39	374	147	374	39	374	39	374	204	374	0	374	329	374	0	374	0	374	0	374	329	374
10	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
11	165	578	351	578	165	578	165	578	0	578	204	578	233	578	204	578	204	578	204	578	233	578
12	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
13	0	413	186	413	0	413	0	413	165	413	39	413	290	413	39	413	39	413	39	413	290	413
14	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
15	186	318	0	318	186	318	186	318	351	318	147	318	476	318	147	318	147	318	147	318	476	318
16	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
17	0	413	186	413	0	413	0	413	165	413	39	413	290	413	39	413	39	413	39	413	290	413
18	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
19	0	413	186	413	0	413	0	413	165	413	39	413	290	413	39	413	39	413	39	413	290	413
20	413	0	318	0	413	0	413	0	578	0	374	0	704	0	374	0	374	0	374	0	704	0
21	290	704	476	704	290	704	290	704	233	704	329	704	0	704	329	704	329	704	329	704	0	704

Tabulka 2: Matice vzdáleností mezi cílovými a výchozími stanicemi vlaků

Na základě tabulky 2 byla vytvořena i následující tabulka 3, jež obsahuje informace o možnostech časové návaznosti jednotlivých spojů. V cílových stanicích je navíc vždy připočítána doba obratu, která ve všech stanicích činí dobu 30 minut, ve stanici A je pak tato doba prodloužena na 90 minut, přičemž k tomuto časovému úseku je navíc ještě připočtena doba jízdy do depa (v obou směrech celkem – 15 minut). Celková doba obratu soupravy ve stanici A tak činí 105 minut.

i/j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
4	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
11	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabulka 3: Matice časových návazností spojů v rámci period

6.1.2. Zápis textu programu optimalizujícího oběhy kmenových částí vlakových souprav v programu Xpress

$model\ obehy\_kmenu$

$uses$ "$mmxprs$";

$n = 21$

$spoj = 0..n$

$c: array(spoj, spoj) of\ real$

$d: array(spoj, spoj) of\ real$

$x: array(spoj, spoj) of\ mpvar$

$end - declarations$

$c::[\,]$

$d::[\,]$

$k:= 100000$

$forall\ (i\ in\ spoj)\ sum\ (j\ in\ spoj)\ x\ (i,j)\ =\ 1$

$forall\ (j\ in\ spoj)\ sum\ (i\ in\ spoj)\ x\ (i,j)\ =\ 1$

$celkove\_naklady := sum\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj)\ (c\ (i,j) + k * d\ (i,j)) * x(i,j)$

$minimize\ (celkove\_naklady)$

$writeln\ ("celkove\ naklady\ jsou\ ", getobjval, "\ Kč")$

$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj | getsol(x(i,j)) > 0)\ writeln("x(", i, ",", j, ") = ", getsol\ (x\ (i,j)))$

$forall\ (i\ in\ spoj, j\ in\ spoj | getsol(x(i,j)) > 0)\ writeln("d(", i, ",", j, ") = ", getsol\ (d\ (i,j)))$

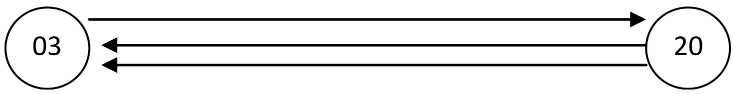
$end - model$

6.1.3. Dosažené výsledky

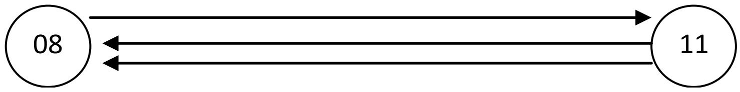
Řešením matematického modelu uvedeného v podkapitole 3.2.3. byly dosaženy následující výsledky:

$x(0,5) = 1$	$x(8,11) = 1$	$x(16,21) = 1$
$x(1,10) = 1$	$x(9,18) = 1$	$x(17,4) = 1$
$x(2,9) = 1$	$x(10,13) = 1$	$x(18,1) = 1$
$x(3,20) = 1$	$x(11,8) = 1$	$x(19,0) = 1$
$x(4,7) = 1$	$x(12,17) = 1$	$x(20,3) = 1$
$x(5,14) = 1$	$x(13,6) = 1$	$x(21,12) = 1$
$x(6,15) = 1$	$x(14,19) = 1$	
$x(7,16) = 1$	$x(15,2) = 1$	

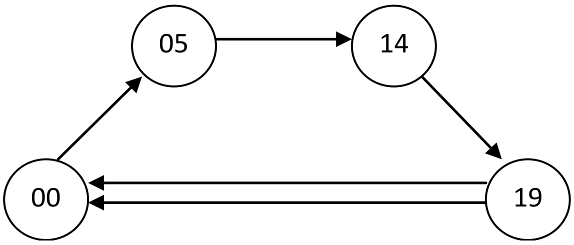
Na základě výsledků získaných optimalizačním software Xpress – IVE bylo zjištěno, že nalezené řešení se v celkových nákladech neliší od současného stavu oběhů železničního dopravce, a proto je optimálních řešení více. Optimalizační software nalezl optimální řešení v pěti obězích. Počet oběhů se sice zvýšil, ale celkový počet kmenových částí souprav zůstal stejný. Na následujících obrázcích budou graficky zobrazeny nové navržené oběhy kmenových částí vlakových souprav.



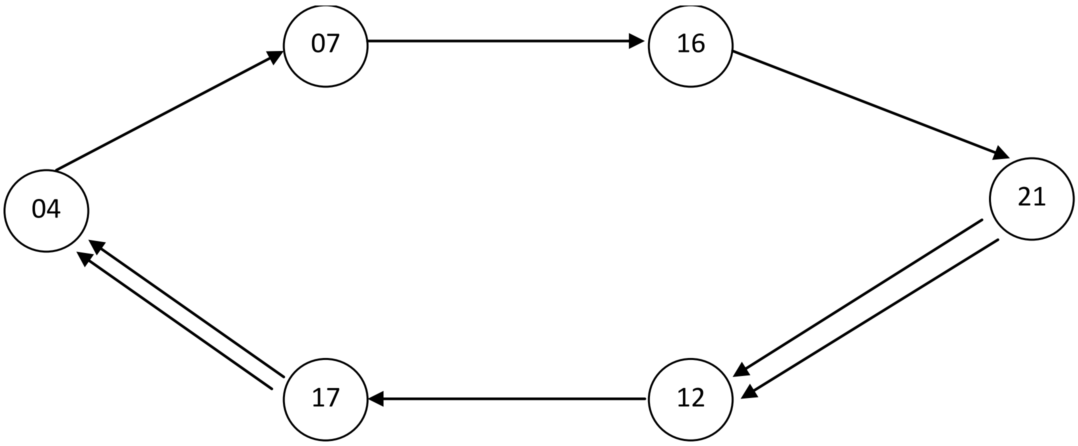
Obrázek 7: Grafické znázornění prvního oběhu



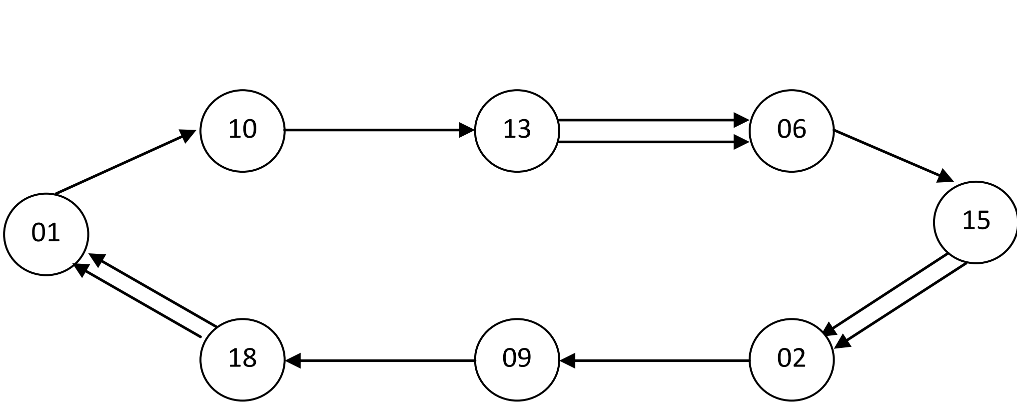
Obrázek 8: Grafické znázornění druhého oběhu



Obrázek 9: Grafické znázornění třetího oběhu



Obrázek 10: Grafické znázornění čtvrtého oběhu



Obrázek 11: Grafické znázornění pátého oběhu

6.2. Vstupní údaje pro optimalizační výpočet úlohy optimalizace docházkové vzdáleností pro dosažení vozů vyšší kvality

Aby bylo možné vyřešit optimalizační úlohu týkající se minimalizace docházkových vzdáleností pro zákazníky cestujících ve vozech vyšší kvality, je znovu nezbytné získat pro tento výpočet určité podklady. Prvním vstupním údajem je docházková vzdálenost cestujících vyšší kvality ve stanici k k příslušnému vozu, je-li zařazen na pozici j.Tyto vstupní údaje jsou přehledně uvedeny v následující tabulce 4.

k / j	1	2	3	4	5	6	7
1	156	130	104	78	52	26	0
2	26	0	26	52	78	104	130
3	125	99	73	47	21	5	31
4	130	104	78	52	26	0	26
5	78	52	26	0	26	52	78
6	156	130	104	78	52	26	0
7	81	55	29	3	23	49	75
8	48	22	4	30	56	82	108
9	104	78	52	26	0	26	52
10	130	104	78	52	26	0	26
11	0	26	52	78	104	130	156
12	156	130	104	78	52	26	0
13	65	39	13	13	39	65	91
14	156	130	104	78	52	26	0
15	65	39	13	13	39	65	91
16	65	39	13	13	39	65	91
17	75	49	23	3	29	55	81
18	91	65	39	13	13	39	65
19	25	1	27	53	79	105	131
20	91	65	39	13	13	39	65
21	44	18	8	34	60	86	112
22	150	124	98	72	46	20	6
23	4	22	48	74	100	126	152
24	52	26	0	26	52	78	104
25	128	102	76	50	24	2	28
26	63	37	11	15	41	67	93
27	130	104	78	52	26	0	26
28	0	26	52	78	104	130	156
29	58	32	6	20	46	72	98
30	82	56	30	4	22	48	74

Tabulka 4: Matice docházkových vzdáleností ve stanici k k příslušnému vozu na pozici j

Dalším podstatným údajem pro optimalizační výpočet je zhodnotit důležitost jednotlivých stanic a zastávek, které jsou danými spoji obsluhovány. Důležitost obsluhovaných uzlů je přímo úměrně závislá na poptávce cestujících využívajících danou stanici či zastávku. Následující tabulka 5 obsahuje údaje o poptávce cestujících vyšší kvality ve stanici k po spoji l. Vzhledem k tomu, že nebyly k dispozici reálné údaje, jsou tyto hodnoty zvoleny.

l / k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	114	125	97	233	241	123	211	100	97	65	111	121	154	123	23	24	188	24	68	211	22	68	245	34	21	67	9	24	32	11
1	256	265	277	155	211	25	178	21	244	122	154	98	124	100	122	65	39	54	69	18	24	57	53	69	123	99	74	65	22	48
2	33	87	56	87	56	22	87	6	31	68	40	13	36	64	12	56	98	15	87	69	24	33	56	44	87	99	56	77	78	56
3	9	69	5	45	12	35	34	29	22	74	26	66	10	46	16	18	24	22	68	20	101	27	33	39	24	27	29	44	29	55
4	58	69	98	105	58	67	55	88	97	100	100	101	66	67	67	34	28	27	26	25	88	99	77	45	33	38	36	38	37	36
5	5	56	34	34	85	57	28	24	39	66	66	41	25	24	29	30	33	46	44	25	22	66	33	44	97	29	39	78	24	66
6	8	88	5	19	1	5	6	11	64	1	64	11	9	4	7	12	26	24	26	3	33	24	21	0	22	24	24	11	16	11
7	1	3	4	11	24	15	16	17	22	19	22	24	28	29	21	21	15	13	18	14	19	15	11	9	8	12	18	18	19	11
8	54	5	4	45	8	55	17	13	19	20	277	14	16	17	12	22	87	16	19	39	41	20	86	16	88	14	16	12	6	2
9	70	16	19	74	15	16	19	87	77	10	21	84	18	16	55	46	17	66	14	163	24	177	159	154	122	96	174	164	168	55
10	268	142	196	157	166	177	174	152	199	100	112	145	98	177	65	156	174	135	68	61	65	77	120	321	244	264	247	511	210	36
11	68	64	499	58	57	266	128	127	122	174	155	175	153	155	187	88	97	74	54	269	154	155	71	17	18	25	64	68	77	63
12	55	15	15	4	18	16	13	22	17	120	56	1	24	17	167	12	17	158	154	111	98	122	11	7	6	91	57	15	17	13
13	35	35	24	25	42	12	12	14	19	20	11	24	156	23	12	14	15	17	13	15	20	22	23	4	15	16	17	20	27	20
14	65	16	16	41	12	16	46	42	1	66	12	3	6	7	54	24	12	14	13	13	12	11	12	54	16	36	15	16	17	6
15	6	2	7	6	12	45	64	21	64	14	11	12	14	15	16	17	67	13	16	18	24	22	41	12	18	16	17	18	25	22
16	56	25	97	15	16	45	35	13	16	17	12	88	245	23	45	47	64	23	56	19	55	14	177	123	11	14	25	54	64	92
17	25	85	5	44	58	64	84	12	56	17	55	88	42	153	12	128	14	159	14	15	12	24	17	125	12	44	19	33	38	24
18	5	55	57	12	14	26	6	67	26	89	66	44	14	15	16	17	45	15	152	151	15	157	53	145	15	17	77	18	98	44
19	52	15	17	45	55	89	54	45	45	45	222	44	15	187	54	48	57	56	85	16	15	53	11	74	56	45	44	68	68	81
20	58	65	66	45	23	56	29	65	68	5	45	44	69	46	45	22	23	24	18	49	34	18	177	156	174	17	18	55	47	15
21	25	26	0	0	5	45	0	46	156	158	144	17	45	89	74	78	88	94	55	47	55	66	47	52	222	244	241	251	248	125

Tabulka 5: Matice poptávky cestujících vyšší kvality ve stanici k po spoji l

V kapitole 4 byly uvedeny jednotlivé typy železničních vozů, které musí být v dané kmenové části vlakové soupravy zahrnuty, aby byl dopravce schopen během přepravy na obsluhované trase zajistit celé spektrum přepravních služeb. Vzhledem k tomu, že optimalizační software Xpress – IVE nedokáže zakomponovat do svého výpočtu více vozů stejného typu, je těmto vozům přiřazeno další pořadové číslo. Pro optimalizační výpočet byly jednotlivé vozy kmenové části vlakové soupravy rozděleny následovně, viz tabulka 6:

označení typu vozu	**bližší specifikace vozu**
1	třída X, klidová zóna
2	třída Y + Z
3	třída Y + Z
4	třída Y + Z
5	třída X, skladovací prostory pro personál
6	třída X, skladovací prostory pro personál
7	třída X zahrnující dětské kupé

Tabulka 6: Označení typů vozů v podmínkách prováděného optimalizačního výpočtu

Aby bylo možné správně vyřešit optimalizační problém řazení kmenové části vlakové soupravy na základě vstupních údajů, je nutné do textu programu zahrnout také podmínky, vyjadřující důležitá specifika provozu z hlediska řazení.

6.2.1. Doplňující omezující podmínky

V celém prostoru vozu typu 1 je nově zavedena klidová zóna, a proto by bylo vhodné zařadit tento vůz na jeden z konců kmenové části vlaku tak, aby se minimalizoval pohyb cestujících a vlakového personálu v daném voze a tím by byl zajištěn klidový režim. To lze zajistit následující podmínkou:

$$x(1,1) + x(1,7) = 1$$

Tato podmínka zajišťuje, že vůz typu 1 bude řazen buď na pozici 1 či na pozici 7 (pokud uvažujeme, že kmenová část vlakové soupravy je sestavena ze sedmi železničních vozů).

Jak již bylo zmíněno v předešlém textu, zákazníci cestující ve vozech vyšší kvality jsou před ostatními cestujícími preferováni a během přepravy by jim měl být zajištěn maximální komfort. Jedním z prvků, jak zvýšit komfort během přepravy je zajištění také nejrychlejší možné obsluhy vlakovým personálem. Vzhledem k faktu, že vozy vyšší kvality nejsou vybaveny skladovacími prostory pro obsluhující personál (v tabulce 6 jsou tyto vozy označeny čísly 2, 3 a 4), je nutné zařadit vedle vozů vyšší kvality takové vozy, které již skladovací prostory zahrnují (v tabulce 6 značeny čísly 5 a 6), a tím by se obsluha zákazníků cestujících ve vozech vyšší kvality zajistila v nejkratším možném časovém úseku. Zařazením těchto dvou typů železničních vozů vedle sebe lze dosáhnout následujícími podmínkami:

$$x(2,1) <= x(5,2) + x(6,2)$$
$$x(3,1) <= x(5,2) + x(6,2)$$
$$x(4,1) <= x(5,2) + x(6,2)$$
$$x(2,7) <= x(5,6) + x(6,6)$$
$$x(3,7) <= x(5,6) + x(6,6)$$
$$x(4,7) <= x(5,6) + x(6,6)$$
$$forall\ (j\ in\ 2..6) x(2,j) <= x(5,j-1) + x(5,j+1)$$
$$forall\ (j\ in\ 2..6) x(2,j) <= x(6,j-1) + x(6,j+1)$$
$$forall\ (j\ in\ 2..6) x(3,j) <= x(5,j-1) + x(5,j+1)$$
$$forall\ (j\ in\ 2..6) x(3,j) <= x(6,j-1) + x(6,j+1)$$
$$forall\ (j\ in\ 2..6) x(4,j) <= x(5,j-1) + x(6,j-1) + x(5,j+1) + x(6,j+1)$$

V prvních šesti podmínkách je zahrnuta možnost, že vozy vyšší kvality ($i = 2,3,4$) budou řazeny na konci kmenové části vlakové soupravy ($j = 1,7$) a v tomto případě je vůz se skladovacími prostory ($i = 5,6$) řazen na druhé (předposlední) pozici ($j = 2,6$). V posledních pěti podmínkách je pak zajištěna možnost, že vozy vyšší kvality ($i = 2,3,4$) budou řazeny uprostřed kmenové části vlakové soupravy ($j = 2,\dots,6$), a poté mohou být vozy se skladovacími prostory řazeny buď před vozem vyšší kvality nebo za ním ($j-1, j+1$).

Do podmínek je také nutné zahrnout, aby vozy stejného typu (zejména vozy se skladovacími prostory pro personál) nebyly řazeny vedle sebe. V případě, že by tato situace v řazení nastala například na konci kmenové části vlakové soupravy, obsluha k poslednímu vozu, který by byl umístěn na protější konec kmenové části vlakové soupravy, by byla značně časově náročná. Takové situaci zabráníme následujícími podmínkami:

$$forall\ (j\ in\ 1..6) x(2,j) + x(3,j+1) <= 1$$
$$forall\ (j\ in\ 1..6) x(3,j) + x(4,j+1) <= 1$$
$$forall\ (j\ in\ 1..6) x(2,j) + x(4,j+1) <= 1$$
$$forall\ (j\ in\ 1..6) x(4,j) + x(2,j+1) <= 1$$

$$forall\ (j\ in\ 1..6) x(4,j) + x(3,j+1) <= 1$$
$$forall\ (j\ in\ 1..6) x(3,j) + x(2,j+1) <= 1$$

6.2.2. Zápis textu programu úlohy o optimalizaci docházkové vzdálenosti zákazníků cestujících ve vozech vyšší kvality v programu Xpress

$model\ dochazkova\_vzdalenost$

$uses$ "$mmxprs$";

$declarations$

$r1 = 7$

$r2 = 7$

$rl = 30$

$r3 = 21$

$typ = 1..r1$

$pozice = 1..r2$

$stanice = 1..rl$

$spoj = 0..r3$

$d: array(pozice, stanice) of\ real$

$p: array(spoj, stanice) of\ real$

$x: array(typ, pozice) of\ mpvar$

$end - declarations$

$d::[\,]$

$p::[\,]$

$forall\ (i\ in\ typ)\ sum\ (j\ in\ pozice)\ x\ (i,j)\ =\ 1$

$forall\ (j\ in\ pozice)\ sum\ (i\ in\ typ)\ x\ (i,j)\ =\ 1$

$x(1,1) + x(1,7) = 1$

$x(2,1) <= x(5,2) + x(6,2)$

$x(3,1) <= x(5,2) + x(6,2)$

$x(4,1) <= x(5,2) + x(6,2)$

$x(2,7) <= x(5,6) + x(6,6)$

$x(3,7) <= x(5,6) + x(6,6)$

$x(4,7) <= x(5,6) + x(6,6)$

$forall\ (j\ in\ 1..6) x(2,j) + x(3,j+1) <= 1$

$forall\ (j\ in\ 1..6) x(3,j) + x(4,j+1) <= 1$

$forall\ (j\ in\ 1..6) x(2,j) + x(4,j+1) <= 1$

$forall\ (j\ in\ 1..6) x(4,j) + x(2,j+1) <= 1$

$forall\ (j\ in\ 1..6) x(4,j) + x(3,j+1) <= 1$

$forall\ (j\ in\ 1..6) x(3,j) + x(2,j+1) <= 1$

$forall\ (j\ in\ 2..6) x(2,j) <= x(5,j-1) + x(5,j+1)$

$forall\ (j\ in\ 2..6) x(2,j) <= x(6,j-1) + x(6,j+1)$

$forall\ (j\ in\ 2..6) x(3,j) <= x(5,j-1) + x(5,j+1)$

$forall\ (j\ in\ 2..6) x(3,j) <= x(6,j-1) + x(6,j+1)$

$forall\ (j\ in\ 2..6) x(4,j) <= x(5,j-1) + x(6,j-1) + x(5,j+1) + x(6,j+1)$

$forall\ (i\ in\ typ, j\ in\ pozice)\ x(i,j) is\_binary$

$dochazkova\_vzdalenost:$

$$= sum\ (i\ in\ typ, j\ in\ pozice, k\ in\ spoj, l\ in\ stanice)\ d\ (j,l) * p\ (k,l) * x\ (i,j)$$

$minimize\ (dochazkova\_vzdalenost)$

$writeln\ ("dochazkova\ vzdalenost\ je\ ", getobjval, "\ m")$

$forall\ (i\ in\ typ, j\ in\ pozice | getsol(x(i,j)) > 0)\ writeln("x(", i, ",", j, ") = ", getsol\ (x\ (i,j)))$

$end - model$

6.2.3. Dosažené výsledky a jejich interpretace

Řešením matematických modelů navržených v podkapitole 3.1.2. byly dosaženy následující výsledky:

$$x(1,1) = 1$$

$$x(2,5) = 1$$

$$x(3,7) = 1$$

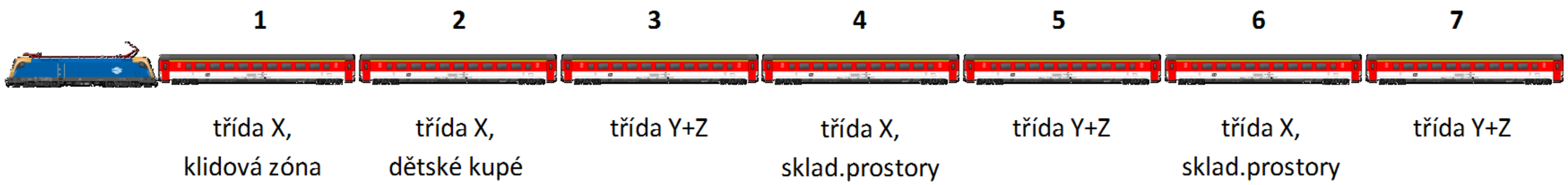
$$x(4,3) = 1$$

$$x(5,6) = 1$$

$$x(6,4) = 1$$

$$x(7,2) = 1$$

Z uvedených výsledků je patrné, že na první pozici je řazen vůz s klidovou zónou (typ 1), vozy vyšší třídy Y a Z (typ 2, 3 a 4) jsou umístěny na pozicích 3, 5 a 7. Byla splněna také podmínka, v níž bylo požadováno, aby vedle vozů vyšší kvality byly řazeny vedle vozů zahrnující skladovací prostory pro personál (typ 5 a 6), tudíž je umožněna rychlejší obsluha vozů poskytující přepravu vyšší kvality (pozice 4 a 6). Řazení kmenové části soupravy je uvedeno na obrázku 12.



Obrázek 12: Návrh nového řazení kmenové části soupravy [5]

7. Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá problematikou optimalizace řazení souprav vlaků společnosti provozující osobní dopravu. Vzhledem ke skutečnosti, že počet vozů, ze kterých se soupravy skládají, je v průběhu plánovacího období různý (což vyplývá z měnící se poptávky po přepravě), byl problém řazení redukován na úlohu o řazení vozů v části soupravy, která cestujícím veřejnosti nabízí co nejširší spektrum služeb, tzv. kmenová část soupravy.

Nad rámec zadání je v práci pozornost věnována také problému ověření optimálního (minimálního) počtu kmenových částí souprav současně zařazených do provozu.

Před vlastním řešením bylo zapotřebí zmapovat a popsat všechny důležité faktory, které řazení kmenových částí souprav ovlivňují – počet cestujících využívajících danou stanici a docházková vzdálenost, kterou musejí cestující absolvovat pro dosažení konkrétního železničního vozu.

Při řešení se ukázalo, že problém řazení vozů je možno formulovat jako optimalizační problém, který je možno vyřešit metodami lineárního programování. Základním výstupem z předložené práce je původní matematický model vytvořený na bázi modelu přiřaďovacího problému. Optimalizačním kritériem je celková docházková vzdálenost cestujících vyžadující vyšší komfort při přepravě. Docházková vzdálenost je vymezena délkou trasy, kterou musí tito cestující absolvovat v prostoru nástupišť obsluhovaných stanic. Navržený model dokáže zohlednit i dodatečná omezení vyplývající z požadavků, že některé vozy musí být řazeny na sousedních pozicích a naopak, že mezi některými vozy musí být řazeny vozy jiné. Navržený model je uveden v kapitole 3. Na základě provedeného experimentu byla prokázána plná funkčnost modelu.

Druhým cílem bylo ověřit, zda dopravce využívá k zajištění provozu minimální počet kmenových částí souprav. Pro toto ověření byl použit již sestavený model o oběhu náležitostí publikovaných v odborné literatuře. Prokázalo se, že tento předpoklad je v případě řešeného dopravce splněn, minimální počet kmenových částí souprav je 8, což odpovídá současnému stavu. Optimalizační výpočty byly prováděny v optimalizačním software Xpress – IVE.

Použitá literatura

[1] PASTOR, Otto; TUZAR, Antonín. *Teorie dopravních systémů*. Vyd. 1. Praha: ASPI, 2007. 312 s. ISBN 978-80-7357-285-3.

[2] Plánky stanic: URL:<http://www.cd.cz/vnitrostatni-cestovani/sluzby-na-nadrazi/planky-stanic/-24912/>

[3] KRUPA, Tomáš: Optimalizace oběhů vozidel MHD.: Diplomová práce. Ostrava: FS VŠB – TU Ostrava, 2012. 50 s.

[4] ZELINA, Juraj: Optimalizace oběhů hnacích vozidel.: Diplomová práce. Ostrava: FS VŠB – TU Ostrava, 2014. 69 s.

[5] Obrázek lokomotivy a osobního železničního vozu: URL: <http://www.vagonweb.cz/razeni/razeni.php?zeme=CD&kategorie=IC&rok=2016/>

Seznam tabulek a obrázků